



## Hoja de Datos de Tecnología de Contaminación del Aire



**1. Nombre de la Tecnología:** Depurador en Húmedo - Cámara de Aspersión  
- Torre de Aspersión

Este tipo de tecnología es una parte del grupo de controles para la contaminación del aire llamados colectivamente “depuradores en húmedo.” Cuando son usados para controlar gases inorgánicos, también puede llamárseles “depuradores de gases ácidos.” Cuando se usan en específico para controlar el bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el término desulfuración del gas de salida (DGS) también puede ser utilizado.

**2. Tipo de Tecnología:** Remoción de contaminantes del aire por impacción por inercia y difusión, reacción con un licor de sorbente o reactivo, o absorción en un solvente líquido.

**3. Contaminantes Aplicables:**

Principalmente la materia particulada (MP), incluyendo la materia particulada menor o igual a 10 micras ( $\mu\text{m}$ ) de diámetro aerodinámico (MP<sub>10</sub>), materia particulada menor o igual a 2.5  $\mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico (MP<sub>2.5</sub>), y contaminantes peligrosos del aire (CPA) en forma particulada (MP<sub>CPA</sub>); y humos inorgánicos, vapores, y gases (por ejemplo, ácido crómico, ácido sulfhídrico, amoníaco, cloruros, fluoruros, y SO<sub>2</sub>). Estos tipos de depuradores también pueden ser utilizados ocasionalmente para el control de compuestos orgánicos volátiles (COV) en ciertas circunstancias. COV hidrófilo puede ser absorbido por fluido ácuo, mientras la adición de *amphiphilic* (un bloque de co-polímero), disuelto en agua puede ser usado para absorber COV hidrófobo. Cuando se usa la absorción como la técnica principal de control, el solvente gastado debe ser fácilmente regenerado o desechado de una manera aceptable para el ambiente (Ref. U.S. *Environmental Protection Agency - EPA*, la agencia de protección del ambiental en EE.UU., 1991).

**4. Límites de Emisión Alcanzables/Reducciones:**

MP: Los depuradores con torres de aspersión por lo general no son utilizados para las aplicaciones en MP fina porque son requeridas altas proporciones de líquido a gas (mayores de 3 litros por metro cúbico (l/m<sup>3</sup>) o 22.4 galones por mil pies cúbicos (gal/1000 ft<sup>3</sup>)). Las eficiencias de recolección varían de 70 a más del 99 por ciento, dependiendo de la aplicación. Las torres de aspersión ciclónicas generalmente alcanzan eficiencias de recolección en la parte alta del rango (Ref. *Perry*, 1984; *Corbitt*, 1990; *EPA*, 1998; *EPA*, 1973).

Gases Inorgánicos: Los vendedores de dispositivos de control estiman que las eficiencias de remoción varían del 95 al 99 por ciento. Las eficiencias de remoción de SO<sub>2</sub> varían del 80 a más del 99 por ciento, dependiendo del tipo de reactivo utilizado y el diseño de la torre de aspersión. La mayoría de las aplicaciones actuales tienen una eficiencia de remoción mayor del 90 por ciento (Ref. EPA, 1993; Sondreal, 1993; Soud, et al., 1993).

COV: Las eficiencias de remoción para los sistemas de absorción de gas varían para cada sistema de contaminante-solvente y con el tipo de absorbente utilizado. La mayoría de los sistemas de absorción tienen eficiencias de remoción por encima del 90 por ciento, y los sistemas de absorción con torres de aspersión pueden lograr eficiencias mayores del 99 por ciento para algunos sistemas de contaminante-solvente. El rango típico de eficiencia de recolección es del 50 al 95 por ciento. Las eficiencias de control menores representan flujos que contienen compuestos relativamente insolubles a bajas concentraciones, mientras que las eficiencias más altas son para flujos que contienen compuestos fácilmente solubles a concentraciones altas (Ref. EPA, 1996; Perry, 1984; EPA, 1991).

**5. Tipo de Fuente Aplicable:** Punto (Puntual en México)

**6. Aplicaciones Industriales Típicas:**

Las aplicaciones de las torres de aspersión incluyen el control de las emisiones provenientes de tanques de almacenamiento de aceite ligero y de benceno utilizando el aceite de lavado como solvente. Las torres de aspersión no padecen de restricciones al flujo de gas debido a residuos acumulados encontrados comúnmente en los depuradores de lecho compactado. Sin embargo, las torres de aspersión poseen la menor capacidad de transferencia de masa efectiva y por lo tanto, están generalmente limitadas a ser usadas para la remoción de MP y con gases de alta solubilidad (Ref. EPA, 1992).

Los depuradores en húmedo seguido son usados como parte de sistemas de DGS, donde son usados para el control de emisiones de la combustión de carbón y aceite provenientes de empresa de servicios públicos eléctricos y de fuentes industriales. Las torres de aspersión son una de las configuraciones más populares de depurador en húmedo usadas para poner los gases residuales en contacto con un sorbente diseñado para absorber y reaccionar con el SO<sub>2</sub>. Los depuradores en húmedo han sido aplicados a las emisiones de SO<sub>2</sub> provenientes de procesos en las industrias de metales primarios no ferrosos (por ejemplo, cobre, plomo, y aluminio), pero plantas de ácido sulfúrico o azufre elemental son los dispositivos de control más populares para controlar las altas concentraciones de SO<sub>2</sub> asociadas con estos procesos (Ref. Soud, et al., 1993).

**7. Características de la Corriente de Emisión:**

- a. Flujo de Aire:** Las proporciones del flujo de gas típicas para un depurador en húmedo con torre de aspersión son de 0.7 a 47 metros cúbicos a condiciones estándares por segundo (m<sup>3</sup>/s) (1,500 a 100,000 pies cúbicos a condiciones estándares por minuto (*scfm*)) (Ref. EPA, 1998).

- b. Temperatura:** En general, entre mayor es la temperatura del gas, menor es la velocidad de absorción, y viceversa. Las temperaturas excesivamente altas también pueden conducir a una pérdida significativa de líquido depurador o de solvente por evaporación. Para los gases residuales en los cuales la MP va a ser controlada, el rango de temperatura es generalmente de 4 a 370°C (40 a 700°F), y para las aplicaciones de absorción de gases, de 4 a 38°C (4 a 100°F) (Ref. *EPA*, 1996; *Avallone*, 1996).
- c. Carga de Contaminantes:** Las concentraciones típicas de los contaminantes gaseosos varían entre 250 y 10,000 partes por millón por volumen (*ppmv*) (Ref. *EPA*, 1996). Los depuradores en húmedo con torres de aspersión no son tan susceptibles a estropearse como otros diseños de depuradores en húmedo, pero relaciones muy altas de líquido a gas pueden ser necesarias para capturar la MP fina (Ref. *EPA*, 1982; *Perry* 1984).
- d. Otras Consideraciones:** Para el control de CPA de vapor orgánico, típicamente se requerirán concentraciones bajas de salida, que conducirían a torres de absorción im-prácticamente altas, largos tiempos de contacto, y altas proporciones de líquido a gas que podrían no ser efectivas en costo. Los depuradores en húmedo por lo general serán efectivos para el control de CPA cuando son utilizados en combinación con otros dispositivos de control tales como incineradores o adsorbentes de carbón (Ref. *EPA*, 1991).

## 8. Requisitos de Pre-tratamiento de la Corriente de Emisión:

Los pre-enfriadores (por ejemplo, las cámaras de aspersión) pueden ser necesarios para reducir la temperatura del aire de entrada hasta niveles aceptables para evitar la evaporación de solvente o las velocidades reducidas de absorción (Ref. *EPA*, 1996).

## 9. Información de Costos:

Los siguientes datos son los rangos de costo (expresados en dólares del cuarto trimestre de 1995) para los depuradores en húmedo con torre de aspersión de diseño convencional bajo condiciones típicas de operación, adaptados a partir de los formatos para estimación de costos de la *EPA* (Ref. *EPA*, 1996) y referidos a la proporción del flujo volumétrico de la corriente de desecho tratada. Para los propósitos de calcular el ejemplo de efectividad de costo, el contaminante es MP a una carga de aproximadamente 7 gramos por metro cúbico a condiciones estándares ( $g/m^3$ ) o 3 gramos por pie cúbico a condiciones estándares ( $gr/scf$ ). Los costos no incluyen los costos de pos-tratamiento o desecho del solvente usado o residuo.

Los costos pueden ser más altos que en los rangos mostrados para aplicaciones que requieren materiales costosos, solventes, o métodos de tratamiento. Como regla, las unidades más pequeñas controlando un flujo residual de baja concentración serán mucho más costosas (por unidad de proporción de flujo volumétrico) que una unidad grande limpiando un flujo con una carga alta de contaminantes. Los costos de operación son mucho más significantes que los costos

de capital para las torres de aspersión ya que estas son relativamente sencillas de construir e instalar, y requieren cantidades relativamente grandes de líquido y velocidades de recirculación más altas (Ref. EPA, 1996).

- a. **Costo de Capital:** \$1,800 a \$8,000 por  $m^3/s$ , (\$0.90 a \$4 por *scfm*)
- b. **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$2,800 a 101,000 por  $m^3/s$ , (\$1.30 a \$48 por *scfm*), anualmente
- c. **Costo Anualizado:** \$3,000 a \$102,000 por  $m^3/s$ , (\$1.45 a \$48 por *scfm*), anualmente
- d. **Efectividad de Costo:** \$28 a \$940 por tonelada métrica (\$26 a \$854 por tonelada corta), costo anualizado por tonelada por año de contaminante controlado.

## 10. Teoría de Operación:

Los depuradores por aspersión consisten en cámaras vacías en forma cilíndrica o rectangular en las cuales la corriente de gas es puesta en contacto con las gotas de líquido generadas por toberas de aspersión. Una forma común es la torre de aspersión, en la cual el gas fluye ascendiendo a través de un banco o bancos sucesivos de toberas de aspersión. A veces se usan arreglos similares en cámaras de aspersión con flujo horizontal del gas. Tales dispositivos tienen caídas de presión de gas muy baja, y todo salvo una pequeña parte de la energía de contacto se deriva de la corriente de líquido. La energía de contacto requerida es obtenida de una combinación apropiada de presión del líquido y proporción de flujo (Ref. Perry, 1984).

La absorción física depende de propiedades de la corriente de gas y del solvente líquido, tales como la densidad y la viscosidad, tanto como de las características específicas del (de los) contaminante(s) en el gas y la corriente de líquido (por ejemplo, la difusividad, la solubilidad en equilibrio). Estas propiedades son dependientes de la temperatura, y las temperaturas más bajas por lo general favorecen la absorción de los gases por el solvente. La absorción también es mejorada por mayores superficies de contacto, altas relaciones de líquido a gas, y alta concentración en la corriente de gas (Ref. EPA, 1991). La absorción química puede ser limitada por la proporción de la reacción, sin embargo la etapa limitadora es típicamente es la proporción de absorción física, no la proporción de la reacción química (Ref. EPA, 1996).

### Control de Gases Inorgánicos:

El agua es el más común de los solventes usados para remover los contaminantes inorgánicos. La remoción de los contaminantes puede ser intensificada manipulando químicamente la solución absorbente de manera que reaccione con el contaminante. Un ejemplo de esto es el uso de la solución cáustica para la absorción de gases ácidos en vez de agua pura como solvente (Ref. EPA, 1996). *Amphiphilic* (un bloque de co-polímeros) disueltos en agua pueden ser usados para remover COV hidrófobo, el cual tiene mucho menos afinidad por el agua que lo que hace el COV hidrófilo.

Usados en sistemas del término desulfuración del gas de salida (DGS), los depuradores con torre de aspersión introducen un licor de reactivo como gotas atomizadas a través de las toberas de aspersión en la parte superior de, o en las plataformas dentro del depurador. El gas cargado de  $\text{SO}_2$  entra en el fondo de la columna hacia arriba a través de un flujo contra la corriente, aun cuando también existen torres de aspersión horizontales que usan un diseño contra la corriente. En la mayoría de los casos el sorbente es un pasta aguada alcalino, comúnmente la piedra caliza, la cal apagada, o una mezcla de cal apagada y la ceniza alcalina, aunque existen muchos otros procesos sorbentes. La absorción de  $\text{SO}_2$  es lograda por el contacto contracorriente entre el gas y pasta aguada de reactivo. Los óxidos de azufre reaccionan con el sorbente, formando una mezcla en húmedo de sulfito y sulfato de calcio (Ref. EPA, 1981; Soud, et al. 1993).

Para los diseños horizontales de DGS, la pasta aguada fresca (las corrientes de recirculación y compensación) están a menudo introducidas en la última o trasera etapa, del absorbedor donde el contenido de  $\text{SO}_2$  de la corriente de gas es el más bajo. La pasta aguada puesta en contacto en la última etapa es bombeado hacia adelante a la siguiente etapa. De esta manera, la pasta aguada “fluye” contra la corriente del flujo de gas. La primera etapa del absorbedor tiene la corriente de gas con la concentración más alta de  $\text{SO}_2$  y una pasta aguada cuya mayor parte de su alcalinidad activa ha sido consumida (Ref. EPA, 1981).

#### Control de MP:

En los depuradores con torre de absorción, la corriente cargada de MP es introducida dentro de la cámara en donde entra en contacto con las gotas de líquido generadas por las toberas de aspersión. El tamaño de las gotas generadas por las toberas de aspersión es controlado para maximizar el contacto entre el líquido y las partículas y, en consecuencia, la eficiencia de recolección del depurador (Ref. EPA, 1998).

Una cámara ciclónica de aspersión es parecida a una torre de aspersión, con la excepción de que la corriente de gas es introducida de tal manera que produzca un movimiento ciclónico dentro de la cámara. El movimiento contribuye a lograr velocidades más altas de los gases, una separación más efectiva entre las partículas y las gotas, y una mayor eficiencia de recolección. Las entradas tangenciales o las aspas que hacen girar el gas son métodos comunes para inducir el movimiento ciclónico (Ref. EPA, 1998).

#### Control de COV:

La absorción es aplicada en el procesamiento químico como una técnica de recuperación de materia prima y/o producto en la separación y purificación de las corrientes gaseosas que contienen altas concentraciones de compuestos orgánicos (por ejemplo, en las operaciones de purificación de gas natural y de recuperación de los productos secundarios del coque). En la absorción, los compuestos orgánicos en la corriente de gas son disueltos en un solvente líquido. El contacto entre el líquido absorbente y el gas de venteo es logrado en torres de aspersión con contracorriente, depuradores, o columnas empacadas o con placas (Ref. EPA, 1995).

Las torres de aspersión no padecen de restricciones al flujo de gas por residuos acumulados como suele ocurrir comúnmente en los depuradores empacadas. Sin embargo, las torres de aspersión poseen la capacidad de transferencia de masa menos efectiva y por lo tanto, están generalmente limitadas a ser utilizadas para la remoción de MP y con gases con alta solubilidad (Ref. EPA, 1992).

### **11. Ventajas/Pros:**

Las ventajas de los depuradores con torres de aspersión incluyen (Ref. *Air and Waste Management Association - AWMA*, la asociación para el manejo de aire y residuos de EE.UU., 1992; EPA, 1996):

1. Una caída de presión relativamente baja;
2. Puede manejar polvos inflamables y explosivos con poco riesgo;
3. La construcción de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRF) permite su operación en atmósferas altamente corrosivas;
4. Un costo de capital relativamente bajo;
5. Relativamente libre de problemas de obstrucción;
6. Requisitos de espacio relativamente bajos; y
7. Capacidad de recolectar tanto MP como gases.

### **12.. Desventajas/Contras:**

Las desventajas de los depuradores con torres de aspersión incluyen (Ref. *AWMA, 1992*; Cooper, 1994):

1. Puede crear un problema de desecho de agua (o líquido);
2. El producto residual se recolecta en húmedo;
3. Eficiencias de transferencia de masa relativamente bajas;
4. Es relativamente ineficiente para remover MP fina;
5. Cuando se usa la construcción de PRF, es sensible a la temperatura; y
6. Costos de operación relativamente altos.

### 13. Otras Consideraciones:

Para la absorción de gases, el agua u otro solvente debe ser tratado para remover el contaminante capturado de la solución. El efluente de la columna puede ser reciclado hacia el sistema y utilizado de nuevo. Por lo general esto es el caso si el solvente es costoso (por ejemplo, los aceites de hidrocarburo, las soluciones cáusticas). Inicialmente, la corriente de reciclamiento puede ir a un sistema de tratamiento de residuos para remover los contaminantes o el producto de la reacción. Entonces se podrá añadir líquido depurador de compensación previo a que la corriente vuelva a entrar en la columna (Ref. EPA, 1996).

Para las aplicaciones con MP, los depuradores en húmedo generan residuos en forma de licor. Esto crea la necesidad tanto del tratamiento de aguas residuales como de la disposición de residuos sólidos. Inicialmente, el licor es tratado para separar el residuo tóxico del agua. El agua tratada puede entonces ser reutilizada o descargada. Una vez que el agua es removida, el residuo remanente estará en forma de sólido o de licor. Si el residuo sólido es inerte y no tóxico, por lo general puede ser desechado en un relleno sanitario. Los residuos tóxicos tendrán procedimientos más estrictos para su disposición. En algunos casos el residuo sólido puede tener valor y puede ser vendido o reciclado (Ref. EPA, 1998).

Para aplicaciones en DGS, el licor se combina con el gas de desecho cargado de SO<sub>2</sub> para formar un pasta aguada residual al fondo del depurador. El fango es removido del depurador y, dependiendo del reactivo o sorbente utilizado para reaccionar con el SO<sub>2</sub>, el fango residual reaccionado es desechado, reciclado o regenerado, o en algunos casos, es un producto vendible. Para las pastas aguadas que producen sulfato y sulfito de calcio, la oxidación del fango residual resulta en yeso. El yeso es un producto preferido porque puede ser comercializado y también por sus características superiores de remoción de agua. La mayoría de los depuradores son operados sin la etapa oxidante y el fango residual debe ser secado y desechado apropiadamente. Algunos licores pueden ser regenerados y utilizados de nuevo, pero pocos de estos sistemas están en uso debido a los altos costos de energía asociados con la regeneración del reactivo (Ref. Sondreal, 1993; Soud, et al., 1993; Merrick, 1989).

La configuración de un dispositivo de control que optimiza el control de más de un contaminante suele no lograr el más alto control posible para ninguno de los contaminantes controlados por sí solos. Por esta razón, los flujos de gas residual que contienen contaminantes múltiples (por ejemplo, MP y SO<sub>2</sub>, o MP y gases inorgánicos) son generalmente controlados con múltiples dispositivos de control, ocasionalmente con más de un tipo de depurador en húmedo (Ref. EC/R Inc., 1996).

### 14. Referencias:

AWMA, 1992. *Air & Waste Management Association, Air Pollution Engineering Manual*, Van Nostrand Reinhold, New York.

Avallone, 1996. "Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers," edited by Eugene Avallone and Theodore Baumeister, 10<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1996.

Cooper, 1994. David Cooper and F. Alley, *Air Pollution Control: A Design Approach*, 2<sup>nd</sup> Edition, Waveland Press, Prospect Heights, IL, 1994.

Corbitt, 1990. *Standard Handbook of Environmental Engineering*, edited by Robert A. Corbitt, McGraw-Hill, New York, NY, 1990.

EC/R, 1996. EC/R, Inc., “Evaluation of Fine Particulate Matter Control Technology: Final Draft,” prepared for U.S. EPA, Integrated Policy and Strategies Group, Durham, NC, September, 1996.

EPA, 1973. U.S. EPA, “National Emissions Data System Control Device Workbook,” APTD-1570, Research Triangle Park, NC, July, 1973.

EPA, 1981. U.S. EPA, Office of Research and Development, “Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources – Volume 1,” EPA-450/3-81-005a, Research Triangle Park, NC, September, 1982.

EPA, 1982. U.S. EPA, Office of Research and Development, “Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources – Volume 1,” EPA-450/3-81-005a, Research Triangle Park, NC, September, 1982.

EPA, 1991. U.S. EPA, Office of Research and Development, “Control Technologies for Hazardous Air Pollutants,” EPA/625/6-91/014, Washington, D.C., June, 1991.

EPA, 1992. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, “Control Technologies for Volatile Organic Compound Emissions from Stationary Sources,” EPA 453/R-92-018, Research Triangle Park, NC, December, 1992

EPA, 1993. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, “Chromium Emissions from Chromium Electroplating and Chromic Acid Anodizing Operations – Background Information for Proposed Standards,” EPA-453/R-93-030a, Research Triangle Park, NC, July, 1993.

EPA, 1995. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, “Survey of Control Technologies for Low Concentration Organic Vapor Gas Streams,” EPA-456/R-95-003, Research Triangle Park, NC, May.

EPA, 1996. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, “OAQPS Control Cost Manual,” Fifth Edition, EPA 453/B-96-001, Research Triangle Park, NC, February, 1996.

EPA, 1998. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, “Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter,” EPA-452/R-97-001, Research Triangle Park, NC, October, 1998.

Merrick, 1989. David Merrick and Jan Vernon, “Review of Flue Gas Desulphurization

*Systems,” Chemistry and Industry, February 6 , 1989.*

*Perry, 1984. “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook,” edited by Robert Perry and Don Green, 6<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1984.*

*Sondreal, 1993. Everett A. Sondreal, “Clean Utilization of Low-Rank Coals for Low-Cost Power Generation,” from “Clean and Efficient Use of Coal: The New Era for Low-Rank Coal,” Organization for Economic Co-Operation and Development/International Energy Agency, Paris, France, 1993.*

*Soud, et al., 1993. Hermine N. Soud, Mitsuru Takeshita, and Irene M. Smith, “FGC Systems and Installations for Coal-Fired Plants” from “Desulfurization 3,” Institution of Chemical Engineers, Warwickshire, UK, 1993.*